

2

STABILIZING METHOD FOR MACHINE SYSTEM

Publication number: JP10055208 (A)

Publication date: 1998-02-24

Inventor(s): BENNING ROGER DAVID; BROWNING DOUGLAS ROY;
ZIPFEL GEORGE GUSTAVE JR +

Applicant(s): LUCENT TECHNOLOGIES INC +

Classification:

- international:

B23Q15/12; F16F15/02; G05B13/02; G05B19/02; G05B19/18;
G05B9/02; B23Q15/007; F16F15/02; G05B13/02; G05B19/02;
G05B19/18; G05B9/02; (IPC1-7): B23Q15/12; G05B13/02;
G05B19/18; G05B9/02

- European:

F16F15/02

Application number: JP19970108520 19970425

Priority number(s): US19960640396 19960430

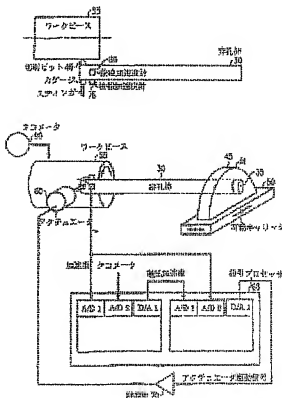
Also published as:

JP3416019 (B2)
EP0805288 (A2)
EP0805288 (A3)
US5816122 (A)
MX9702929 (A)

more >>

Abstract of JP 10055208 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To stabilize a boring rod on a device which cuts a work piece by applying a cutting chip supported on the boring rod to the surface of the rotating work piece. **SOLUTION:** This method is provided with an error sensor 75 which detects the motion of the boring rod 30 in its normal direction (perpendicular to the surface of the work piece 55 at the point where the cutting chip 40 comes into contact with the surface of the work piece 55) and an error sensor 80 which detects the motion of the boring rod 30 in its tangential direction (parallel to the direction of the motion of the surface of the work piece 55 at the contact point).; Further, the method is provided with a means which generates a reference signal corresponding to the signal from the error sensor and an adaptive filter which operates corresponding to the signals from the error sensor and reference signal generating means. A generalized force derived from the correction signal outputted by the adaptive filter is applied to the boring rod 30, which is stabilized.



Data supplied from the **espacenet** database — Worldwide

【特許請求の範囲】

【請求項1】 機械システムの少なくとも1つの要素を、機械的擾乱へのエコー状態応答に対して安定化させる方法において、

a. 前記システムの少なくとも1点における動きを検知することにより、少なくとも1つのエラー信号を生成するステップと、

b. 前記システムの動きに直接関係する少なくとも1つの非前進参照信号を生成するステップと、

c. 適応フィルタを動作させることにより、前記エラー信号および参照信号に応じた補正信号を生成するステップと、

d. 前記補正信号に応じて機械的アクチュエータを駆動することにより、前記補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記要素に加えるステップとからなることを特徴とする、機械システム安定化方法。

【請求項2】 前記要素は回転する機械に機械的に結合した要素であり、

前記ステップcは、前記エラー信号に対して、前記回転する機械の約1回転周期の遅延量を示す補正信号を生成することを特徴とする請求項1の方法。

【請求項3】 前記要素は回転するワークピースに機械的に結合した要素であり、

前記ステップcは、前記エラー信号に対して、前記回転するワークピースの約1回転周期の遅延量を示す補正信号を生成することを特徴とする請求項1の方法。

【請求項4】 前記ステップbは、前記エラー信号の一部を分岐させるステップを含むことを特徴とする請求項1の方法。

【請求項5】 前記要素は回転する機械に機械的に結合した要素であり、

前記ステップcは、前記参照信号に対して、前記機械システムの少なくとも1つの構造共振周波数におけるスペクトルエネルギーの量を示す補正信号を生成することを特徴とする請求項1の方法。

【請求項6】 前記ステップaは、回転する金属ワークピースを工具が切削している間に該工具の動きを検知するステップを含むことを特徴とする請求項1の方法。

【請求項7】 前記ステップaは、前記ワークピースの表面で前記工具に接触している部分に垂直な方向の工具の動きを検知するステップを含むことを特徴とする請求項6の方法。

【請求項8】 前記ステップaは、前記ワークピースの表面で前記工具に接触している部分に接する方向の工具の動きを検知するステップを含むことを特徴とする請求項6の方法。

【請求項9】 前記ステップdは、補正された一般化力が前記アクチュエータから前記工具に直接加えられるように実行されることを特徴とする請求項6の方法。

【請求項10】 前記ステップbは、補正された一般化

力が前記アクチュエータから構造支持部材を通して前記工具に伝達されるように実行されることを特徴とする請求項6の方法。

【請求項11】 補正された一般化力は前記アクチュエータから穿孔棒を通して前記工具に伝達されることを特徴とする請求項10の方法。

【請求項12】 機械システムの少なくとも1つの要素を、機械的擾乱へのエコー状態応答に対して安定化させる方法において、

a. 前記システムの少なくとも2点における動きを検知することにより、少なくとも第1および第2のエラー信号を生成するステップと、

b. 各エラー信号に対応して、前記システムの動きに直接関係する少なくとも第1および第2の非前進参照信号を生成するステップと、

c. 少なくとも第1および第2の適応フィルタを動作させることにより、各エラー信号および対応する参照信号に応じた少なくとも第1および第2の補正信号を生成するステップと、

d. 前記補正信号に応じて少なくとも第1および第2の機械的アクチュエータを駆動することにより、各補正信号からそれぞれ導出される安定化のための少なくとも2つの一般化力を前記要素に加えるステップとからなることを特徴とする、機械システム安定化方法。

【請求項13】 第1および第2のアクチュエータはそれぞれ、前記機械システムの別個の要素に安定化のための一般化力を加えることを特徴とする請求項12の方法。

【請求項14】 第1および第2のアクチュエータはそれぞれ、前記機械システムの同一の要素に安定化のための一般化力を互いに直交する方向に加えることを特徴とする請求項12の方法。

【請求項15】 前記ステップbは、前記第1のエラー信号から前記第1の参照信号を分岐させるとともに、前記第2のエラー信号から前記第2の参照信号を分岐させるステップを含むことを特徴とする請求項12の方法。

【請求項16】 回転するワークピースに接触することが可能な切削チップを穿孔棒が支持するような金属切削装置の穿孔棒を安定化させる方法において、

前記切削チップが前記ワークピースの表面に接触する点において前記ワークピースの表面に垂直な方向を法線方向と定義し、前記接触する点において前記ワークピースの表面に平行であるとともに前記ワークピースの表面の動きの方向に平行な方向を接線方向と定義し、前記方法は、

a. 前記穿孔棒のたわみを検知することにより、第1のエラー信号と、該第1のエラー信号から分岐される少なくとも第1の参照信号とを生成するステップと、

b. 少なくとも第1の適応フィルタを動作させることにより、少なくとも前記第1のエラー信号に応じた少なく

3

とも第1の補正信号を生成するステップと、
c. 前記第1の補正信号に応じて少なくとも第1の機械的アクチュエータを駆動することにより、前記補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記穿孔棒に加えるステップとからなることを特徴とする、金属切削装置の穿孔棒を安定化させる方法。

【請求項17】 前記ステップaは、前記穿孔棒の法線方向のたわみを検知することにより前記第1のエラー信号を生成し、前記穿孔棒の接線方向のたわみを検知することにより第2のエラー信号を生成するステップを含むことを特徴とする請求項16の方法。

【請求項18】 前記ステップbは、前記第1の適応フィルタを動作させることにより少なくとも前記第1のエラー信号に応じた第1の補正信号を生成し、第2の適応フィルタを動作させることにより少なくとも前記第2のエラー信号に応じた第2の補正信号を生成するステップを含む、

前記ステップcは、前記第1の補正信号に応じて前記第1のアクチュエータを駆動することにより法線方向の一般化力を前記穿孔棒に加え、前記第2の補正信号に応じて第2のアクチュエータを駆動することにより接線方向の一般化力を前記穿孔棒に加えるステップを含むことを特徴とする請求項17の方法。

【請求項19】 前記第1の適応フィルタは、前記第1の補正信号が前記第1のエラー信号に依存するが前記第2のエラー信号には依存せず、かつ、前記第2の補正信号が前記第2のエラー信号に依存するが前記第1のエラー信号には依存しないように動作することを特徴とする請求項18の方法。

【請求項20】 機械システムの少なくとも1つの要素を、機械的擾乱へのエコー状態応答に対して安定化させる装置において、

エラー検知位置における前記システムの動きを示すエラー信号を生成する少なくとも1つのエラーセンサと、前記システムの動きに直接関係する少なくとも1つの非前進参照信号を生成する参照信号生成手段と、前記エラーセンサおよび前記参照信号生成手段からの信号に応じて動作する少なくとも1つの適応フィルタと、前記適応フィルタから受信される補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記要素に加える少なくとも1つの機械的アクチュエータとからなることを特徴とする、機械システム安定化装置。

【請求項21】 前記参照信号生成手段は前記エラーセンサからのタップからなることを特徴とする請求項20の装置。

【請求項22】 前記機械システムは回転する機械を有し、前記参照信号生成手段は、前記エラーセンサから分岐される信号を前記回転する機械の約1回転周期だけ遅延させる遅延要素をさらに有することを特徴とする請求項2

4

1の装置。

【請求項23】 前記要素は回転するワークピースに機械的に結合した要素であり、前記参照信号生成手段は、前記エラーセンサから分岐される信号を前記回転するワークピースの約1回転周期だけ遅延させる遅延要素をさらに有することを特徴とする請求項21の装置。

【請求項24】 前記参照信号生成手段は、前記システム中を伝搬する機械的信号の表示を生成する参照センサからなり、該参照センサは、前記エラーセンサが前記機械的信号に応答した後に該参照センサが前記機械的信号に応答するように配置されることを特徴とする請求項20の装置。

【請求項25】 機械システムの少なくとも1つの要素を、機械的擾乱へのエコー状態応答に対して安定化させる装置において、

エラー検知位置における前記システムの動きを示すエラー信号を生成する少なくとも2つのエラーセンサと、各エラー信号に対応して、前記システムの動きに直接関係する少なくとも2つの非前進参照信号を生成する参照信号生成手段と、前記エラーセンサおよび前記参照信号生成手段からの信号に応じて動作する少なくとも第1および第2の適応フィルタと、前記適応フィルタから受信される補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記要素に加えるように配置された少なくとも第1および第2の機械的アクチュエータとからなることを特徴とする、機械システム安定化装置。

【請求項26】 各アクチュエータは、別個の要素に安定化のための一般化力を加えるように配置されることを特徴とする請求項25の装置。

【請求項27】 前記第1および第2のアクチュエータは、同一の要素に安定化のための一般化力を互いに直交する方向に加えるように配置されることを特徴とする請求項25の装置。

【請求項28】 前記第1のアクチュエータは前記第1の適応フィルタからの信号を受信し、

前記第2のアクチュエータは前記第2の適応フィルタからの信号を受信し、

前記第1の適応フィルタは前記第1のエラーセンサからの信号を受信するが前記第2のエラーセンサからの信号は受信せず、

前記第2の適応フィルタは前記第2のエラーセンサからの信号を受信するが前記第1のエラーセンサからの信号は受信しないことを特徴とする請求項25の装置。

【請求項29】 各参照信号生成手段は前記エラーセンサからのタップからなることを特徴とする請求項25の装置。

【請求項30】 回転するワークピースを切削整形する

装置において、
 切削チップを支持し該チップを前記ワークピースに対して保持する弾孔棒と、
 前記弾孔棒の動きを検知する少なくとも1つのエラーセンサと、
 前記エラーセンサからの信号に応じて参照信号を生成する参照信号生成手段と、
 前記エラーセンサおよび前記参照信号生成手段からの信号に応じて動作する少なくとも1つの適応フィルタと、
 前記適応フィルタから受信される補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記弾孔棒に加える少なくとも1つの機械的アクチュエータとからなることを特徴とする、ワークピース切削整形装置。

【請求項31】 前記参照信号生成手段は、前記エラーセンサからの信号を分岐するタップと、分岐される信号を前記ワークピースの約1回転期遅延させる遅延要素とからなることを特徴とする請求項30の装置。

【請求項32】 切削チップを回転するワークピースの表面に当てることによって該ワークピースを切削整形する装置において、

前記切削チップが前記ワークピースの表面に接触する点において前記ワークピースの表面に垂直な方向を法線方向と定義し、前記接触する点において前記ワークピースの表面に平行であるとともに前記ワークピースの表面の動きの方向に平行な方向を接線方向と定義し、前記装置は、

前記切削チップを支持し該チップを前記ワークピースに対して保持する弾孔棒と、

前記弾孔棒の法線方向の動きを検知する第1のエラーセンサおよび前記弾孔棒の接線方向の動きを検知する第2のエラーセンサと、

前記第1および第2のエラーセンサからの信号に対応して第1および第2の参照信号を生成する第1および第2の参照信号生成手段と、

前記第1のエラーセンサおよび前記第1の参照信号生成手段からの信号に応じて動作する第1の適応フィルタならびに前記第2のエラーセンサおよび前記第2の参照信号生成手段からの信号に応じて動作する第2の適応フィルタと、

前記第1の適応フィルタから受信される補正信号から導出される、法線方向の安定化のための一般化力を前記弾孔棒に加える第1の機械的アクチュエータと、

前記第2の適応フィルタから受信される補正信号から導出される、接線方向の安定化のための一般化力を前記弾孔棒に加える第2の機械的アクチュエータとからなることを特徴とする、ワークピース切削整形装置。

【0001】

【発明の詳細な説明】

【発明の属する技術分野】本発明は、機械システムにおける振動を抑制するための能動制御法に関し、特に、回

転するワークピース（製造工程にある製品）の機械加工中のツールピース（工具）の振動の抑制に関する。

【0002】

【従来の技術】長年にわたって、好ましくない機械的振動は、移動部品を含む機械システムや、使用時に振動ノイズ源に機械的に接続される機械システムの設計者を悩ませている。このようなシステムには、特に、回転する金属ワークピースを切削する機械がある。このようなシステムとしてはさらに、ワークピースの減法整形のための機械や、光学機器とその支持フレーム、リソグラフィおよびその他の製造工具とその支持フレーム、さまざまな種類の画像システムとその支持フレーム、ならびに自走式の乗物が含まれる。

【0003】例えば、金属切削動作では、回転可能なワークピースに対して達成される表面仕上げの品質は、「びりり」（チャタ）あるいはその他の振動不安定性を示す切削工具の性質によって制限されることが多い。この問題はボーリング（弾孔）動作では特に重大である。ボーリング動作は、切削工具が比較的に長い片持ち支持棒の端部に装着されることを必要とする。この種の構造は問題のある機械的共振が多いため、チャタは、エンジンや発射筒のような円筒状弾孔を有する機械加工物品内で達成可能な表面仕上げに対する重大な制限となることが分かっている。

【0004】実時間信号処理が機械システムにおける好ましくない振動の問題に適用されている。一般に、動きセンサを用いて、好ましくない振動に関する情報を含む信号を生成する。この信号はデジタル信号プロセッサに送信される。デジタル信号プロセッサは、送信される情報を用いて、電気機械アクチュエータを駆動する補正信号を生成する。このようなアクチュエータは、機械システムにおける応答を生成し、これは好ましくない振動に対抗することになる。

【0005】現代制御理論は、能動的な振動制御のための補正信号を生成するためにデジタル信号処理の過程で適用される周知技術の1つである。略言すれば、現代制御理論（Modern Control Theory, MCT）では、センサ信号を、一定の実数値係数化したものの線形結合から補正アクチュエータ駆動信号を生成する。すなわち、補正駆動信号は、エラーセンサ出力の状態のほぼ瞬時の表示である。これにより、広帯域のフィードバック制御システムが実現される。簡単に言えば、MCTは、単一センサ、単一アクチュエータのフィードバック制御の多次元拡張である。

【0006】例えば、MCTを機械工具要素に対する能動制御デバイスに適用することが、米国特許第5,170,103号（発行日：1992年12月8日、発明者：K.E. Rouch他）（以下「Rouch特許」という。）に記載されている。このデバイスでは、弾孔棒の位置および速度の信号を生成するセンサと、弾孔棒の自由端付近に

7

装着した反作用質量と、反作用質量の変位および速度の信号を生成するセンサと、弾孔棒の好ましくない振動を打ち消すように反作用質量を変位させるアクチュエータとを有する。信号プロセッサでは、MCTの方法に従って2つの速度信号および2つの変位信号をスケールリングし結合して補正信号を生成する。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】現代制御理論のさまざまな適用例を通じて、実務家は、好ましくない振動の抑制において大きな進歩を達成している。しかし、例えば

【0008】

【課題を解決するための手段】上記の課題を解決するために、本発明による機械システム安定化方法、すなわち、機械システムの少なくとも1つの要素を、機械的擾乱へのエコー状態に対して安定化させる方法は、

a. 前記システムの少なくとも1点における動きを検知することにより、少なくとも1つのエラー信号を生成するステップと、

b. 前記システムの動きに直接関係する少なくとも1つの非前進参照信号を生成するステップと、

c. 適応フィルタを動作させることにより、前記エラー信号および参照信号に応じた補正信号を生成するステップと、

d. 前記補正信号に応じて機械的アクチュエータを駆動することにより、前記補正信号から導出される安定化のための一般化力を前記要素に加えるステップとからなることを特徴とする。

【0009】

【発明の実施の形態】

【A. 用語の説明】以下では、以下の各用語は次に説明するような意味を有する。

【0010】適応フィルタとは、システムのパフォーマンスを制御するための時変自己調整ディジタル信号処理デバイスである。このデバイスは、入力信号（参照信号ということもある。）に作用して出力信号を生成する。システムのパフォーマンスは、少なくとも部分的には、この出力信号に依存する。このフィルタは、実際のシステムパフォーマンスと所望のシステムパフォーマンスの差を最小にするために、入力信号の処理を自動的に最適化する（すなわち、適応する）。

【0011】トランスバースアルフィルタと呼ばれる特定のタイプの適応フィルタは、さまざまな固定遅延における入力信号の順次時間サンプルを、それぞれに可変重みをつけて線形結合することによって、入力信号を処理する。

【0012】システムの機械的擾乱に対するエコー状態応答とは、1つまたは複数の時間遅延において検出可能な自己相関を示す応答を意味する。ここで、自己相関は、

8

もとの機械的擾乱の波形とは独立であって、代わりに、システム自体のインパルス応答における時間相関の結果である。

【0013】一般化力とは、反応質量や構造内機械的アクチュエータを含む任意の手段によって生成される力、振動力、トルク、あるいは曲げモーメントのことである。

【0014】前進参照信号とは、適応レギュレータープ内の適応フィルタに対する参照信号のことである。これは、図1および図2を参照して理解される。

【0015】図1に、コントローラ1.1を用いて補正信号を生成し、プラント1.2で擾乱ノイズ n と足し合わせた結果のエラー信号 e を縮小するようにしたものの概略を示す。図示のように、プラント1.2は、擾乱パス1.3およびアクチュエータパス1.4からなる。プラント1.2への信号入力がない場合、出力変位は（物理的プラント上の特定の空間的位置に対する）エラー信号 e である。このエラー信号は、ノイズのみの変位応答 d と、アクチュエータのみの変位応答 y の差を表す。すなわち、 $e = d - y$ である。線形のプラントの場合、応答 d および y は、加算点1.5で表される物理的測定位置で足し合わされる。

【0016】コントローラ1.1の1つの形式は、当業者に周知のFXLMS（フィルタリングした x の最小平均二乗）アルゴリズムを実装した適応トランスバースアルフィルタである。このコントローラの形式を図2に示す。（FXLMSアルゴリズムの実装のいくつかの本質的な特徴は、図を単純化するために省略してある。）

【0017】理解されるように、図1と図2で同じ参照符号で表される共通の要素がある。しかし、図2では、コントローラ1.1の代わりに適応フィルタ2.1がある。さらに、分岐点2.2から、適応フィルタの参照入力部へ参照信号 x をもたすライン2.3が追加されている。

【0018】図2に示した構成は1つの従来技術である。参照信号 x は、信号 x の各（時間的）セグメントがフィルタ2.1で受信されるのは、エラー信号 e の対応するセグメントがフィルタ2.1で受信されるより前であるという意味で、前進している。信号 e は、擾乱パス1.3に固有のレイテンシによる遅延の後に到着する。従来の適応レギュレータ構成では、フィルタ2.1の適応プロセスとアクチュエータパス1.4に固有のレイテンシを合わせたものを補償するために、信号 x を前進させることが好ましいと考えられている。これにより、フィルタは、信号 x と相関するノイズ成分を相殺することによってエラー信号から広帯域のノイズを除去することができる。

【0019】実装では、分岐点2.2は、機械的構造物に対する擾乱力の入力点にできるだけ物理的に近い構造物上の点に位置する。例えば、エアーセンサおよびアク

チュエータは、地震負荷に対する高層ビルディングの揺れを安定化させるために、ビルディングの屋上に配置される。このような場合、分岐点2、2の有用な位置は地表レベルであり、そこで地震加速度計のような適切なトランスデューサが電気的参照信号を供給することになる。

【0020】このように、参照信号が前送参照信号であるということと意味していることは、参照位置における与えられた信号の存在と、エラー位置における同じあるいは類似の信号の到着の間に正の時間遅延があることである。換言すれば、擾乱力の入力点において構造体に瞬間力が加えられた場合、参照センサは、エラーセンサが構造体応答の表示を生成する前に応答することになる。

【0021】非前送参照信号について、図3を参照して説明する。理解されるように、ライン2、3および分岐点2、2は図3にはなく、その代わりに、エラー信号eは参照信号xとともに作用する。これは、参照信号がエラー信号より前にフィルタ2、1に到達しないという点で、従来技術の適応制御方法との相違を表している。これは、非前送参照信号の一例である。

【0022】実際には、非前送参照信号は、エラー信号から直接とるだけではなく、例えば、安定化させるべき回転機械のシャフト回転周波数に直接関係する狭帯域信号（代表的には、正弦波）を生成するタコメータからとることも可能である。

【0023】非前送参照信号のもう1つの例は、高層ビルディングの屋上レベルセンサの出力である。このセンサは、ビルディングの揺れに関係する広帯域信号を生成し、ビルディング内または地上レベル付近に配置されたエラーセンサおよびアクチュエータと協力して作用する。

【0024】一般的な意味で、参照信号が非前送であるとは、参照位置における与えられた信号の存在と、エラー位置における同じあるいは類似の信号の到着の間に0または負の時間遅延があることである。このように、参照センサは、擾乱力入力点において加えられる衝撃力に対して、同じ衝撃力に応答するエラーセンサと同時に、またはそれより後に、応答する。

【0025】再生フィードバックについて、図4を参照して説明する。図4では、擾乱パス1、3が、 $H(s)$ 、 $A(s)e^{sT}$ および μe^{-sT} を含むように拡張されている。 $H(s)$ （ボックス4、4）は、無限インピーダンス（すなわち、無反射）境界条件を仮定する構造体共振数である。 $A(s)e^{sT}$ （ボックス4、1）は、周波数依存時間遅延 T （s）においてエコー状応答を生成する構造体境界条件応答を表し、構造共振ダイナミクスを生じる。 μe^{-sT} （ボックス4、2）は、構造共振とは独立の固定時間遅延 T を有するエコー効果を表す。（このような固定時間遅延は、例えば、以下で説明するような、機械加工システムの回転する工具の周期

である。）理解されるように、マイクロ波周波数に依存しない振幅であり、 $A(s)$ は周波数依存の振幅であり、 s はラプラス変換した周波数変数である。機械加工動作の具体的な場合、 μ は、引き続き切削間の重畳率（ $0 \leq \mu \leq 1$ ）である。

【0026】図4に示したように、ボックス4、1およびボックス4、2はいずれも、構造ノイズ応答の一部を加算点4、3に戻すそれぞれのフィードバックループに含まれる。これらのループはいずれも、擾乱 n に対するエコー状応答を生じる。しかし、ボックス4、1によって表される共振フィードバックは、本明細書における用語の意味による再生フィードバックではない。他方、ボックス4、2によって表される固定時間遅延フィードバックは、実数値で大きき一定のシステムの応答の一部が純粋に時間遅延により（局所的または周期的に）擾乱ノイズに加えられる場合、再生フィードバックである。

【0027】ボックス4、1によって表される共振フィードバックは、フィルタリング機構 $A(s)e^{-sT}$ を介して擾乱ノイズに加えられる。ただし、 $A(s)$ は複素数値関数（複素数に値をとる関数）であり、周波数依存時間遅延項 $T(s)$ とともに、安定な共振ダイナミクスを生じる。

【0028】他方、再生フィードバックループは、不安定な出力応答 d を生じる。これは、関連するループ利得が1を超え、擾乱ノイズ n と変位応答 d の間の位相角が 180° を超える場合に起こる。

【0029】重要なことは、正の再生フィードバックは共振システムを容易に不安定化させることがあるということである。その理由は、再生ループ利得は共振周波数で高くなりやすいからである。このため、再生フィードバックループ4、2が共振フィードバックループ4、1とともに存在することにより不安定な出力応答 d が生じ得る。（不安定な出力応答は、例えば共振周波数に比べて長い時間間隔のようなかなり長い時間にわたって出力の大きさが連続的に増大することによって特徴づけられる。）

【0030】[B. エコー状機械的振動現象の適応制御] 図3に示したコントローラ構成は、エラー信号 e から直接分岐された（従って、エラー信号に対して前送も遅延もしていない）参照信号 x を適応フィルタ2、1の動作と関連させている。理論的には、この構成が有効な振動周波数の帯域幅は、擾乱信号 d における自己相関の程度に依存する。その理由は、適応フィルタは、エラー信号 e に見出される自己相関（あるいは共振）成分を除去するという限りで有効に動作するからである。

【0031】この理論的境界は、一般に、前送参照信号を有する適応フィルタの従来の使用には当てはまらない。しかし、この点に関して注意すべき点であるが、図3のように構成された、エラー信号から直接分岐された参照信号を有する適応フィルタは、これまでは、機械的

11

構造体における振動を制御するためには使用されていない。そのような応用への1つの障害は、適応FXLMSコントローラを有効に動作させるためには前送参照信号が必要であるという不正確な仮定である。

【0032】これに対して、本発明の発明者は、構造共振応答の制御は、再生フィードバック効果の制御とともに、フィルタへの参照入力としても作用する信号エラー検知位置を用いて達成されることを示した。すなわち、発明者は、図3の制御構造を用いて、ある振動制御問題を解くことが実行可能であることを示した。

【0033】この点に関して注意すべき点であるが、図3の制御構造は、時間前送参照信号が物理的に得られない場合、例えば、実行可能な限りエラーセンサが切削チップのできるだけ近くに配置されるべきであるような機械加工動作のような場合に特に有用である。また、この制御構造は、共振ダイナミクスを制御して単一センサのアプローチによりコストが削減されるような場合に特に有用である。

【0034】図3に示したコントローラ構成、および、さらに一般的には、非前送参照信号が適応フィルタに入力されるような適応コントローラ構成は、図4に示したような広範囲の振動問題を解くために適用される。その問題とは、1つまたは複数の構造共振（ボックス4、

1)の存在、あるいは、再生フィードバック（ボックス4、2)の存在が、構造応答付近での振動不安定性を生じようとする問題である。

【0035】適応フィルタによる、エラー信号からの自己相関成分（1つのエラー/参照センサがある場合）または参照信号との相互相関成分（参照信号が非前送であり別のセンサから得られる場合）の除去は、時間遅延フィードバックパス4、1および4、2に関連する信号成分の除去として理解することができる。例えば、適応フィルタ2、1（図3参照）がうまく反応しているとき、エラー信号 e は、近似的には、エコーパス効果（すなわち、ボックス4、1および4、2による効果）が除去あるいはほとんどコントローラ帯域幅 B_{Weol} 以内に縮小された場合、ノイズ源 n によって駆動された無反射構造応答関数 $H(s)$ （図4のボックス4、4)の出力のようになる。

【0036】コントローラ帯域幅は、以下の考察から評価することができる。

【0037】(i) システムの自然の共振応答が制御可能であるためには、全アクチュエータ遅延 T_{del} は、共振周期 T_{res} の半分より小さくなければならない。すなわち、 $T_{\text{del}} < T_{\text{res}}/2$ である。遅延 T_{del} は、コンピュータサンプリング遅延、フィルタ遅延のような信号調整遅延、およびアクチュエータにおける遅延からの寄与を含む。

【0038】(ii) 再生振動が制御可能であるためには、アクチュエータ遅延は、機械回転などの、不安

12

定性を駆動するエネルギーの周期入力 T_{rev} より小さくしなければならない。すなわち、 $T_{\text{del}} < T_{\text{rev}}$ である。

【0039】これらの考察から明らかに、動作時には、非前送参照信号は、関係するエコー周期 $(T_{\text{rev}}$ または T_{res} 、もしくは、場合によってはその倍数によって特徴づけられる)に関して時間的に実質的に前送させられる。

【0040】このように、振動コントローラの効果は、プラントが有限帯域幅のノイズ源によって励振されたときにプラントの自然の共振挙動を除去するものとして理解することができる。さらに、条件によっては、コントローラは、再生フィードバックの周期的影響を除去するものとして理解することができる。これが成立するのは、適応フィルタの長さ（すなわち、フィルタのタップによって張られる時間の全長と、非使用タップの代わりに介在する巡回バッファやその他のプログラムされた遅延の和）が、少なくとも1周期 T を含むほど十分に長い場合である。

【0041】本発明の振動コントローラは、金属ワークピースの切削、研削、フライス削、および穿孔のための機械、光学および電磁的映写システム、機体フレーム、橋梁、その他のトラスまたはビーム構造、回転推進エンジン、ならびに宇宙船アンテナを含む（これらの例に限定されない）広範囲の機械的構造における振動を縮小するのに有用であると考えられる。（最後の例に関しては、本発明の振動コントローラは、宇宙船アンテナにおける周知のジッタ現象を縮小するのに有用であると考えられる。）

【0042】このような応用例の一般的なアプローチを図5に例示する。L個のアクチュエータ5、1はそれぞれ適応フィルタ5、2によって駆動される。M個のエラーセンサ5、3はそれぞれエラー信号をL個の適応フィルタのそれぞれへ送信する。各適応フィルタに対して、M個のエラーセンサのうち1つが、そのフィルタへの参照入力を提供する。各適応フィルタの取込ステップは、M個のエラー信号のそれぞれからの寄与を含む。この寄与のサイズは、関連するエラーセンサと、関連するアクチュエータの間の伝達関数の評価値に関係する。これについての詳細は後述する。

【0043】曲げモード（一般に、平行および接線と呼ばれる2つの直交するタイプのモード）、ねじれモード、輪モード（少なくとも実質的に軸方向に圧縮性の構造部材において）、およびシェルモードを含むさまざまな種類の機械的運動が、エラーセンサによって検知される。複数のエラーセンサはそれぞれ、同じ位置における別々の種類の運動、あるいは、別々の位置における同じ種類の運動を検出することが可能であり、また、これらのさまざまな方式の組合せも可能である。同様に、L個のアクチュエータは、同じ位置における別々の種類の運

13

動、別々の位置における同じ種類の運動、別々の位置における別々の種類の運動、あるいはこれらの組合せを駆動することが可能である。

【0044】[C. 機械加工動作における再生チャタ] 機械加工動作における好ましくない振動の1つの源は、工具の運動の過渡の特徴が、後の時刻における工具運動に対して強める寄与をするときに起こる再生フィードバックである。このような時間遅延した正のフィードバック機構は、例えば、現在の切削幅が、先行するワークピース回転中になされた切削の一部に重なるような、金属回転動作中に生じることがある。

【0045】結果として生じる工具の振動(「チャタ」という。)は、ワークピースの加工表面に得られる仕上げの品質を制限することになる。

【0046】この現象に関する初期の理論的記述は、H. E. Merritt, "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter", Journal of Engineering for Industry (1965年11月)で提案された。この研究で、Merrittは、あるワークピース回転から次の回転への切削幅の重畳率(重なり合いの比率)に基づいて再生フィードバック係数 μu を導入した。

【0047】Merrittのモデルの概略を図6に示す。図示されているように、一次フィードバックパス10は、工具変位 $y(s)$ を即時切削深さ u に関係づける。(理解されるように、変数 s は、周知のようにラプラス変換法からの周波数変数である。)再生フィードバックパス20は、係数 μu と遅延因子 e^{-sT} によって特徴づけられる。遅延因子 e^{-sT} は、1回転周期 T による遅延を表す。図中に示した変数 $F(s)$ は、周波数領域の切削力を表し、切削スティフネス K_c を介して即時切削深さに関係づけられる。工具の運動はこれらの力に対する応答である。切削深さダイナミクス $G(s)$ は、工具応答を、加えられた切削力に関係づける。このダイナミクスは、一般に、比較的硬いあるいは壁の硬いワークピースの機械加工中の工具の力学的性質を表す。

【0048】本発明の発明者は、再生フィードバックによって駆動される少なくとも2種類のチャタがあることを発見した。本明細書ではこれらのチャタをそれぞれ「広帯域再生チャタ」および「狭帯域再生チャタ」という。重要なことであるが、これらの種類のチャタはいずれも、回転周波数の倍数の時間遅延において大きな自己増幅を示す。この意味で、これらのチャタはいずれも、機械的擾乱に対するエコー状応答である。再生チャタの理解の一部は、例えば、回転するワークピースの機械加工中の工具変位のバースベクトルから得られる。このスペクトルでは、広帯域および狭帯域のいずれのチャタも、回転周波数に等しい増分で規則的に間隔をおいたスペクトル線を有する微細構造を示す。

【0049】狭帯域チャタは一般に、ニッケル合金およびチタンのような比較的硬い材料を低い回転速度で機械

14

加工している間に観測される。これに対して、広帯域チャタは一般に、アルミニウムやスチールのような比較的軟らかい金属を比較的高い回転速度で機械加工している間に観測される。しかし、狭帯域チャタに関係のある硬さおよび速度の領域と、広帯域チャタに関係のある領域の間に明確な区分はない。

【0050】広帯域チャタと狭帯域チャタの間の1つの区別は、上記のバースベクトルから明らかになる。広帯域チャタのスペクトルは、一般に、穿孔棒の自然の周波数の10%~30%上の周波数を中心とする主ピークを示す。このようなピークは、図7において、第1高調波付近のピークとともに、318.5 Hzの基本周波数において明らかである。(理解されるように、これらのピークはそれぞれ、上記の複数のスペクトル線の合成である。)これに対して、狭帯域チャタのスペクトルは一般に、工具あるいはワークピースの1つまたは複数の共振周波数を中心とする狭いピークを示す。このようなスペクトルを図8に示す。

【0051】Merrittモデルは、広帯域再生チャタの原因となる機構の解明にある程度成功している。しかし、これまでのところ、高度な機械加工動作のユーザによって要求される十分な表面仕上げの品質を提供するために、能動的振動制御の技術を適用して広帯域または狭帯域のチャタを縮小することは実現されていない。

【0052】本発明の発明者は、比較的硬い金属を切削するとき(狭帯域チャタが起きるような条件下で)、擾乱バースの再生ループ20(図6参照)は構造応答のうち1つにおいて(与えられた時刻に)、プラント内に不安定性を生じやすいことを発見した。発明者は、図3の方法(例示的にエラー信号を非前進参照信号として用いた)は、構造応答エネルギーを縮小しながら、再生フィードバック効果を縮小するのに有効であることを発見した。これを、図9の理想バースベクトルのさまざまな特徴によって説明する。図9において、共振ピークは、切削ノイズに対する自然共振応答による部分600と、再生フィードバックによる部分610に分けられている。制御された帯域幅は、図中の領域620で示され、機械的構造の制御された応答は、曲線部分630および振幅640によって示されている。

【0053】さらに、発明者は、軟らかい金属を比較的高い回転速度で切削するとき(広帯域チャタが起きるような条件下で)、ループ20(図1参照)は、自由共振周波数の上の一群の周波数において、プラント内に不安定性を生じやすいことを発見した。この場合、発明者は、適応フィルタがワークピースの少なくとも1回転周期にわたるほど十分に長い場合に限り、図3の方法は再生ループに拮抗することを発見した。

【0054】これを、図10の理想バースベクトルのさまざまな特徴によって説明する。図10において、曲線700は、理想化された自由共振応答を表し、曲線

15

710は、対応する、制御された切削動作を表す。領域730は、制御された帯域幅を表す。

【0055】[D、実施例] 本発明の方法は、特に、アクチュエータ制御信号を生成するために現代制御理論を適用しないという点で、Rough特許の方法とは異なる。代わりに、上記のように、本発明は、適応トランスバースフィルタを用いて、アクチュエータに入力する補正信号を特徴づける係数を自動的に更新する。本発明の方法は、多くの種類の機械的システムにおける機械的擾乱に対するエコー状応答を抑制するのに有効であると考えられる。機械加工動作の具体例の場合、本発明は、広帯域および狭帯域の再生チャタを両方とも抑制するのに有効である。

【0056】FXLMSアルゴリズムのような周知の計算方法を用いることによって、適応フィルタは適当な参照信号に作用して補正信号を生成する。各係数は、補正信号の成分の一部の寄与（すなわち重み）を指定し、補正信号は、それぞれの増分された参照信号を遅延させることによって生成される。（これらの増分は一般にフィルタに組み込まれた設計あるいはプログラムされる。アナログ遅延線との類似により、各増分はフィルタの「タップ」に関係づけて言及されることも多い。）これらの重みは、エラー信号の大きさを下方に駆動するように周期的に更新される。

【0057】本発明の重要な特徴は、適応フィルタが非前進参照信号を受信することである。実際、ある実施例では、参照信号とエラー信号がいずれも、実質的に、工具運動の同じ時変記述子に対応し、実際に、同じ工具運動センサによって提供されることが可能である。この記述子は一般に、工具の変位関数または加速度関数である。（加速度関数は、変位関数の2階導関数である。）

【0058】同じセンサを用いてエラー信号と参照信号の両方を提供するという本発明の実施例は、特に、広帯域チャタを抑制するのに有用である。このような応用例では、再生フィードバックによって引き起こされる現在の工具のたわみと、1回転間隔後に起こることになるたわみの間に既知の相関がある。ワークビースの回転周期に最も良く一致する対応する遅延を有するフィルタタップは、一般に補正信号への実質的な寄与をなす。（回転周期の約数付近のタップ、すなわち、回転周波数の倍数付近のタップもまた、補正信号に実質的に寄与するが、その寄与は一般に小さい。）実際、少なくともいくつかの場合には、フィルタ係数の取束（すなわち、適応期間）は、1回転間隔だけ参照信号を遅延させる（従って、実際には、各フィルタタップに1回転間隔を加える）ように調整されたオプションの遅延線でフィルタを強化することによって改善される。

【0059】以下で、静止した工具が回転する金属ワークビースを切削するという機械加工動作におけるチャタを抑制するための、本発明の実施例について説明する。

16

なお、この説明は例示的なものであり、本発明はこの実施例に限定されない。実際、本発明は、ワークビースが固定され工具が回転する場合を含む他の種類の機械加工動作や、フライス削り、穿孔、および研削の動作などにおける振動を抑制するためにも適用されると考えられる。さらに一般的に、本発明は、上記のような多くの種類の機械システムにおける機械的擾乱に対するエコー状応答を抑制するために適用されると思われる。

【0060】図11に示したように、代表的な金属回転設備は、一端35に装着された穿孔棒30を有する。穿孔棒の他端には切削ビット40が装着されている。穿孔棒の台45は可動キャリッジ50上に装着されている。キャリッジの移動により、切削ビットはワークビース5に接触することができる。回転周期Tおよび回転速度F(Hz)でワークビースを回転させる手段（図示せず）も設けられる。ここで $F=1/T$ である。

【0061】また、図には、信号プロセス65から発信され増幅器70によって増幅された補正信号に従って切削ビットを変位させるための電気機械的アクチュエータ60が示されている。工具ビットあるいは穿孔棒の動きを検知するための少なくとも1つのセンサが必要である。

【0062】例として2つのセンサが図示されている。そのうちの一方は法線加速度計75であり、工具ビット付近の点で、ワークビース表面の法線方向に、穿孔棒の（切削工具の作用点における）加速度を検知する。他方のセンサは接線加速度計80であり、ワークビース表面に接する方向の（そして、穿孔棒の長軸に垂直な）、穿孔棒の加速度を検知する。加速度信号は、工具ビット運動の記述子として直ちに直接使用することができ。あるいは、速度または変位の信号のような関連する信号を記述子として使用することも可能である。発明者は現在のところ、変位信号 $X(t)$ を使用するのが好ましいと考える。その理由は、この信号は、結果として得られる表面仕上げに直接関係するためである。

【0063】動きセンサが加速度計である場合、変位信号 $X(t)$ を得るために、加速度計出力を2回積分する必要がある。この操作は、以下で詳述するように、信号プロセス65によって実行される。

【0064】理解されるように、本発明の方法の応用において、切削ビットおよび穿孔棒の、他のさまざまな機械的運動に注目することができる。そのような他の運動には、例えば、穿孔棒のねじれや、ワークビース表面の法線および接線方向における穿孔棒のたわみがある。さらに、これらの運動を、工具の位置から離れた穿孔棒上の位置で測定することも有益であることがある。さらに、理解されるように、現在のところ好ましいのは加速度計の使用であるが、他の種類の動きセンサも利用可能であり、本発明におけるその使用は当業者には明らかである。そのような他のセンサには、例えば、光センサお

よびビエゾ電気歪みゲージがある。

【0065】重要なことは、発明者が、広帯域チャックを制御するには一般に法線変位信号が有効であり、一方、狭帯域チャックを制御するには一般に接線変位信号が有効であることを発見したことである。

【0066】上記のように、少なくとも1つのセンサの出力が信号プロセッサに入力される。また、タコメータ90が設けられ、その出力もまた信号プロセッサに送られる。タコメータの目的は、回転速度Fの現在の読みを提供することである。

【0067】アクチュエータ60は、例えば、電気力学的シェラ（加減機）である。（このような装置では、磁気巻線を流れる電流と、コイルおよびそのコイルに取り付けられたピストンに加わる力が正比例する。このピストンは「スティング」と呼ばれることもある。）理解されるように、この場合に他の種類のアクチュエータも使用可能であり、それは当業者には明らかである。そのような他のアクチュエータは、例えば、慣性アクチュエータ質量に対して、あるいは、穿孔棒の基台を通して作動力を伝える関節でつながったクランプに対して、動力伝導部として使用されるビエゾ電気スタックがある。

【0068】重要なことは、発明者が、広帯域チャックを制御するには、ワークピースの表面に垂直な工具変位を生成するようにアクチュエータを調整することが一般に非常に有効であることを発見したことである。他方、狭帯域チャックを制御するには、発明者は、工具の接線変位が一般に有効であることを発見した。

【0069】図12を参照すると、補正信号 d 。(s)を提供する簡単な方法は、工具変位信号をフィードバックすることである。広帯域チャックを補正するために（しかし、一般に、狭帯域チャックを補正するためではない）、この信号は、回転周期Tにほぼ等しい遅延 Δ を加えた後にフィードバックされる。この遅延は、信号処理要素100で生成される。信号処理要素100は、アナログ遅延線とすることが可能であるが、好ましくは、入力端でアナログ-デジタル（A/D）変換を行い出力端でデジタル-アナログ（D/A）変換を行うデジタル信号プロセッサである。

【0070】補正信号は（必要に応じて遅延された後）、反転増幅器110で増幅され、アクチュエータ（図ではブロック120としてモデル化されている）に送られ、補正変位 $y_c(s)$ を生成する。この補正変位は、切削ビットにおいて切削システムに固有の他の変位と加算されて、全変位 $y_e(s)$ を生成する。センサ（例えば図1の加速度計75または80）は、（必要に応じて、適当な信号積分器とともに用いられて）注目する切削ビット変位に比例する変位信号 $x(t)$ を生成する。

【0071】遅延 Δ および増幅器利得Kは、工具の観測

されるチャックを最小にするように（手動または自動で）調節される。上記のように、この目的のための Δ の最適値は、回転周期Tに等しくなる。

【0072】図12の補正システムはかなりのノイズ低減ができるが、現在のところ好ましい図13のシステムによりさらに改善が可能である。このシステムでは、加速度信号 $d^2x(t)/dt^2$ （すなわち、変位信号の2階導関数）が、（ボックス200におけるA/D変換の後に）、エラー信号210および参照信号215としてデジタル適応フィルタ205に入力される。

【0073】上記のように、参照信号215は、オプションとして、適応フィルタに入力される前に時間遅延 Δ を受ける。この遅延は、例えば、巡回バッファ220によって与えられる。回転周期Tの更新された推定値（ Δ はこの値に設定される）は、ボックス225に示したA/D変換（必要な場合）の後にタコメータによって巡回バッファに送られる。（上記のように、時間遅延要素220は、狭帯域チャックに対する補正システムでは一般に使用されない。）

【0074】上記のように、適応フィルタ205は補正信号230を生成し、これは、ボックス235に示したD/A変換の後、アクチュエータに送られる。図のボックス240に記号Yで示した「プラント」は、工具の実際の動きをアクチュエータへの電気的入力に関係づける伝達関数である。プラント推定値Yは、プラントYの数学的モデルであり、補正システムの構成要素として、ボックス245に示されるように与えられる。参照信号は、ボックス245でフィルタリングされて、フィルタリングされた参照信号250が生成される。信号250およびエラー信号210は、ボックス255で表される適応フィルタに入力され、この適応フィルタの重みを更新する。重みは、以下で説明するアルゴリズムに従って更新される。

【0075】図示したように、適応フィルタ205、重み更新ユニット255、プラント推定値245、オプションの巡回バッファ220、A/Dコンバータ200および225、ならびにD/Aコンバータ235は、機能要素260（以下「デジタルコントローラ」という。）内に含まれる。これらのさまざまな機能は、個別にあるいは組合せとして、別々の構成要素によって提供されることも可能であるが、1つまたは複数のデジタル信号プロセッサによってこれらの機能を実行することが現在のところ好ましい。このようなプロセッサあるいはプロセッサ群、デジタルコントローラ260とみなすことができる。

【0076】信号サンプリング技術の当業者に周知のように、アンチエイリアシングフィルタ265および270を含めることにより、それぞれ、エラー信号およびタコメータ信号から、サンプリングプロセスの歪み物を除去すると有利である。また、再構成フィルタ275を合

19

めることにより、補正信号230を平滑化し、デジタル処理段の間に導入されるデジタル雑物を除去すると有利である。

【0077】適応フィルタの重み係数を更新するには、現在のところ、周知の「フィルタリングされたX最小平方二乗」(FXLMS)アルゴリズムを用いるのが好ましいと考える。このアルゴリズムは、例えば、B. Widrow and S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall (1985)に記載されている。他の、さらに計算量の多いアルゴリズムを用いて、例えば最適重みベクトルへの収束を速くすることも可能である。しかし、そのようなアルゴリズムでは、デジタルプロセッサの計算能力に対する要求が厳しくなる。この点に關して重要なことは、適応フィルタの動作に必要な計算量は、フィルタタップの数の2乗とともに増大することである。

【0078】FXLMSアルゴリズムによれば、重み係数の更新を支配する方程式は次式である。

$$w^{(1)}_{k+1} = \alpha w^{(1)}_k + 2\mu_{111} e_k x^{(1)}_k$$

ただし、 $w^{(1)}_{k+1}$ は、適応フィルタの更新された重みベクトルであり、 $w^{(1)}_k$ は前のサンプル期間の重みベクトルであり、 μ_{111} は適応フィルタの収束ステップサイズであり、 e_k は現在のサンプル期間のエラーであり、 $x^{(1)}_k$ はプラント推定値245を通してフィルタリングした後の参照信号ベクトルである。記号 α はいわゆるリーク係数を表し、1以下の正の値をとる。われわれの検討で用いた α の典型的な値は0.9である。

【0079】さらに具体的には、ベクトル $x^{(1)}_k$ は、次式に従ってエラー e_k およびプラント推定値 Y と関係づけられる。

$$x^{(1)}_k = e_k * Y^*$$

$$x^{(1)}_k = x^{(1-1)}_{k-1}$$

【0080】記号 $*$ は畳込み演算を表す。通常、 Y^* と畳み込まれる信号は、別の参照センサからの参照信号である。しかし、本発明では、 Y^* は、エラーセンサからの信号 e_k と畳み込まれる。

【0081】添字 i は1から N までを走る。ただし、 N は適応フィルタのタップの数である。 N の例示的な値は1024である。発明者が見出したところでは、広帯域チャタが優勢であるような応用例において再生フィードバックを制御するための適応フィルタの動作において広帯域の周波数を拒絶するためには、この値が有効である。

【0082】さらに一般的には、 N は、ワークピースの少なくとも1回転周期を含むほどに大きくすべきであり、好ましくは、2以上の回転周期を含むべきである。

【0083】複数のフィルタおよび複数のアクチュエータの場合、上記の方程式は次のように一般化される。

【数1】

20

$$[w^{(i)}_{k+1}]_{\lambda} = \alpha [w^{(i)}_k]_{\lambda} + 2(\mu_{mi})_{\lambda} \sum_{j=1}^M (e_k)_j (x^{(i)}_k)_{\lambda j}$$

$$(x^{(i)}_k)_{\lambda j} = (e_k)_{m_i} * Y_{\lambda j}$$

ただし、 L はアクチュエータの数であり、 M はセンサの数であり、添字 λ は1から L までを走り、添字 m は1から M までを走る。量 $Y^*_{\lambda j}$ は、アクチュエータ λ とセンサ j の間の伝達関数推定値である。各適応フィルタごとに、1つのエラーセンサが参照入力を提供するように作用する。すなわち、出力 $(e_k)_a$ を有するセンサが、伝達関数推定値と畳み込まれる。

【0084】一般的に、フィルタが適応され、重み係数の値が安定化した後であっても、何らかの残留エラーが工具変位信号に（あるいは、同じことであるが、加速度計信号に）存在する。このエラーは、引き続きワークピース回転の間の無相関ノイズを表す。これは、新しい材料の切削に対する切削システムの応答の無相関部分として説明することができる。

【0085】オプションとして、上記の補正システムは、適応フィルタ205を迂回する線形レギュレータフィードバックループによって増強される。このようなフィードバックループは、穿孔棒の自然のダイナミクスを補償することができたため、エラー信号に残る線形応答ノイズを抑制することによって表面仕上げをさらに改善することが可能となる。

【0086】この点に關して注意すべき点であるが、それぞれのフィードバックループ（すなわち、FXLMSループおよび線形レギュレータループ）は、互いのプラント伝達関数に影響を与える。従って、それぞれのループに対して安定なプラント推定値を決定するためには、1つ以上の反復サイクルが必要となる。例示的なこのようなループでは、適応フィルタをまず収束させた後、線形レギュレータループに対するプラント推定値を決定し、その後には、FXLMSループに対する新たなプラント推定値を決定する。

【0087】【例】発明者は、図14に示した構成を用いて本発明のコントローラの実験的試験を実行した。穿孔棒300をクランプ305に固定し、クランプ305は、旋盤モータによって一定送り速度で駆動される旋盤キャリッジ（図示せず）に取り付けた。リングクランプ（図示せず）が、法線シェーカ310および接線シェーカ315を穿孔棒に固定する。穿孔棒の末端には、図示のように、接線方向の横運動を測定する加速度計320と、法線方向の横運動を測定する加速度計325を取り付けた。この場合、法線方向とは、切削チップ330の作用点において、回転するワークピース327の表面に垂直な方向であり、接線方向とは、切削チップの作用点において、ワークピースの動きに平行で、ワークピース表面に接する方向である。図14から明らかなように、

21

第3の方向である軸方向（すなわち、穿孔棒の長手軸に平行な方向）もまた、ワークピース表面に平行とすることが可能である。この実験では、この軸方向に関する切削チップの偏向を制御しようとはしなかった。その理由は、そのような偏向によるチャタよりも、法線チャタもしくは接線チャタまたはその両方のほうがずっと大きいからである。軸方向の制御は、大きい軸方向圧縮性を示す穿孔棒を有する構造（あるいはその他の重要な構造要素）において容易に実行可能である。

【0088】【狹帯域チャタ試験】ワークピースをInconel 718から作成した。この材料あるいはその他のニッケル合金を（対称な断面の穿孔棒を用いて）切削するとき、背景切削ノイズに重なって、まず、穿孔棒の基本周波数およびその高調波付近に集中した接線方向のたわみとして狹帯域チャタが現れることが分かった。

【0089】しかし、このチャタが大きくなるにつれて、法線方向のたわみ（同じく棒の共振周波数に集中している）が現れる。重要なことであるが、達成可能な表面仕上げの品質に直接関係するのは法線チャタのほうである。発明者は、接線方向のたわみを制御することは、法線方向の1次モードチャタを縮小するのに有効であり、それにより、結果として得られる表面仕上げを改善することができるを見出した。

【0090】本発明によるコントローラは、標準的な、参照パワーが正規化されたFXLMSアルゴリズムを実装し、各サンプル周期ごとに1回ずつ適応フィルタの重みを更新した。参照信号は、エラーセンサの出力から分岐させた。（この場合、エラーセンサは接線加速度計であった。）

【0091】図15は、コントローラをオフにした場合と、コントローラをオンにした場合における、718 Inconel（ロックウェル硬度は38）の機械加工中の法線チャタの大きさの周波数スペクトルである。ワークピースは0.47 Hzで回転し、切削深さは0.51 mmであり、送り速度は1 回転あたり0.25 mmである。穿孔棒はスチールであり、張出し（オーバハング）比は1.0である。接線加速度を（積分なし。必要なだけ積分すれば加速度は例えば変位に変換される）エラー信号として使用する。適応フィルタ長は256タップであった。これは、8 kHzのサンプルレートで全時間が32 msであることを表す。基本チャタ周波数は、100 Hz付近に現れているが、これは穿孔棒の1次モード周波数である。

【0092】図16は、対応する接線チャタの大きさの周波数スペクトルである。

【0093】発明者は、回転速度がさらに増大すると、穿孔棒のさらに高い共振モードで、高次のチャタが現れることを発見した。発明者は、基本モードより高いチャタを抑制する際には法線方向および接線方向のたわみを両方とも制御することが好ましいことを見出した。発明

22

者は、法線方向制御ループと接線方向制御ループを、それらの間の相互結合なしに独立に用いるのが有効であることを見出した。図5は、例えばエラーセンサ e_1 を法線エラーセンサとし、エラーセンサ e_2 を接線エラーセンサとし、 e_1 を適応フィルタ1のみに接続し、 e_2 を適応フィルタ2のみに接続し、アクチュエータ1を法線アクチュエータとし、アクチュエータ2を接線アクチュエータとした場合に、二重制御ループの使用を例示している。

【0094】【広帯域チャタ試験】発明者は、試験において、広帯域チャタを減少させるには接線方向の制御よりも法線方向の制御のほうが有効であることを見出した。

【0095】図17は、4140鋼の切削中のコントロールをオンおよびオフにした場合の、法線チャタの大きさの周波数スペクトルである。ワークピースは5.75 Hzで回転し、切削深さは1 mmであり、送り速度は1 回転あたり0.125 mmである。適応フィルタ長は1024タップであった。これは、4 kHzのサンプルレートで256 msを表す。

【0096】【慣性アクチュエータ】また、発明者は、穿孔棒内に含まれる慣性アクチュエータをシェーカ（これは、例えば図14に示したように穿孔棒の外部に装着した）の代わりに用いたときにも定性的に同様の結果を得た。穿孔棒410内の慣性アクチュエータ400の位置を図18に示す。

【0097】

【発明の効果】以上述べたごとく、本発明によれば、機械システムにおける好ましくない振動を効率的に制御することが可能となる。本発明は、広帯域および狹帯域の再生チャタを両方とも抑制するのに有効である。

【図面の簡単な説明】

【図1】能動振動制御を実行するための一般的レギュレータの概念図である。

【図2】能動振動制御のための適応レギュレータの概念図である。

【図3】エラー信号と基準信号が同じであるような適応レギュレータの概念図である。これは、非零遅延基準信号を用いたレギュレータの特殊な場合である。

【図4】固定時間遅延再生フィードバックを有する共振構造の振動挙動の概念図である。

【図5】複数のエラーセンサおよび複数の機械アクチュエータを有する適応レギュレータの概念図である。

【図6】H. E. Merrittによる理論的モデルによって、金属回転動作中に存在する再生フィードバックシステムの概略図である。

【図7】広帯域チャタを示す代表的な金属回転動作中の工具変位のパワースペクトルの図である。この図で、ワークピースの回転速度は5.75 Hzであり、ワークピース材料は4130鋼であり、切削深さは0.5 mmで

あり、送りレートは1回転あたり0.0325mmである。各切削とその前の切削の間には一般にいくらかのオーバーラップ(重畳)がある。オーバーラップの正確な量は一般に送りレートに依存する。工具ビットは張出し比 L/D が6の片持ち穿孔棒に装着される。パラメータ L は穿孔棒の長さを表し、パラメータ D は穿孔棒の直径を表す。

【図8】狭帯域チャタを示す代表的な金属回転動作中の接線方向の工具変位のワースベクトルの図である。インコネル製ワークピースは、切削深さ0.51mm、送りレートは1回転あたり0.25mm、張出し比は11で、0.47Hzで回転する。

【図9】狭帯域チャタの理想化されたワースベクトルの図である。

【図10】広帯域チャタの理想化されたワースベクトルの図である。

【図11】回転するワークピースを含む、金属回転機械の概略図である。この図には、本発明の一実施例の方法を実行する信号プロセッサおよび電気機械アクチュエータも示されている。

【図12】図6のフィードバックシステムに追加される制御システムの概略図である。この制御システムは、工具変位を制御するための補正信号 $F_c(s)$ を出力する。この補正信号は、一部は、鋼筋可能遅延デバイスをを用いて工具変位信号を1回転周期だけ遅延させ、増幅器利得 K を加えることによって導出される。

【図13】本発明の一実施例による、適応フィルタを含む制御システムの概略図である。

【図14】本発明の実施例を実験的に評価するために用いられる制御された金属切削装置の概略図である。

【図15】狭帯域チャタ条件下で図14の装置に対して測定される接線方向のチャタの大きさの周波数スペクトルの図である。

【図16】狭帯域チャタ条件下で図14の装置に対して測定される接線方向のチャタの大きさの周波数スペクトルの図である。

【図17】広帯域チャタ条件下で図14の装置に対して測定される接線方向のチャタの大きさの周波数スペクトルの図である。

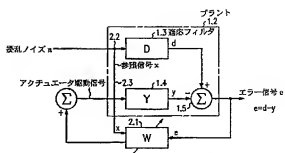
【図18】図14の金属切削装置の穿孔棒内の機械アクチュエータの代替配置を示す概略図である。

【符号の説明】

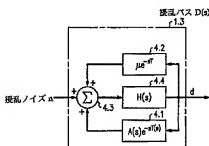
1. 1 コントローラ
1. 2 プラント
1. 3 擾乱/バース
1. 4 アクチュエータバース
1. 5 加算点
2. 1 適応フィルタ
2. 2 分岐点

2. 3 ライン
4. 1 共振フィードバックループ
4. 2 再生フィードバックループ
4. 3 加算点
5. 1 アクチュエータ
5. 2 適応フィルタ
5. 3 エラーセンサ
- 10 1 一次フィードバックパス
- 20 2 再生フィードバックパス
- 30 3 穿孔棒
- 40 4 切削ビット
- 45 5 合
- 50 6 可動キャリッジ
- 55 7 ワークピース
- 60 8 電気機械的アクチュエータ
- 65 9 信号プロセッサ
- 70 10 増幅器
- 75 11 法線加速度計
- 80 12 接線加速度計
- 90 13 タコメータ
- 100 14 信号処理要素
- 110 15 反転増幅器
- 120 16 アクチュエータ
- 200 17 A/Dコンバータ
- 205 18 デジタル適応フィルタ
- 210 19 エラー信号
- 215 20 参照信号
- 220 21 巡回バツファ
- 225 22 A/Dコンバータ
- 30 230 23 補正信号
- 235 24 D/Aコンバータ
- 240 25 プラント
- 245 26 プラント推定値
- 250 27 フィルタリングされた参照信号
- 255 28 重み更新ユニット
- 260 29 デジタルコントローラ
- 265 30 アンチエイリアシングフィルタ
- 270 31 アンチエイリアシングフィルタ
- 275 32 再構成フィルタ
- 40 300 33 穿孔棒
- 305 34 クランプ
- 310 35 法線シェーカ
- 315 36 接線シェーカ
- 320 37 加速度計
- 325 38 加速度計
- 327 39 ワークピース
- 330 40 切削チップ
- 400 41 慣性アクチュエータ
- 410 42 穿孔棒

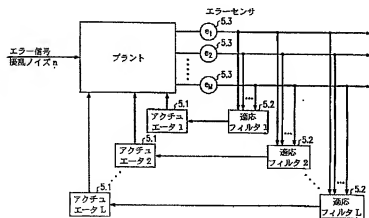
【圖 2】



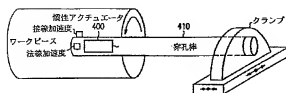
【图4】



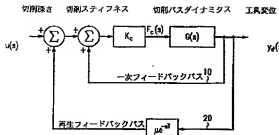
【圖5】



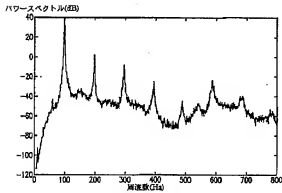
【18】



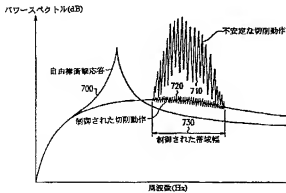
【図6】



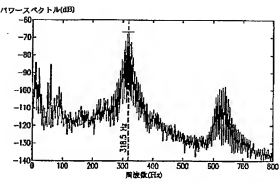
【図8】



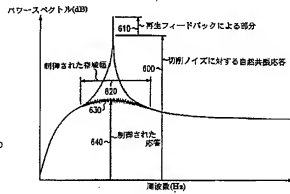
【図10】



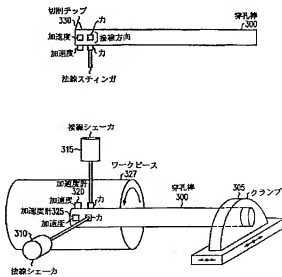
【図7】



【図9】

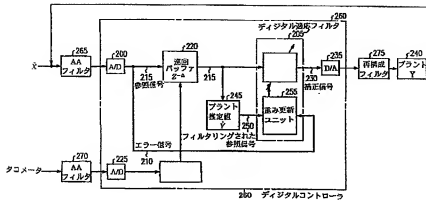


【図14】

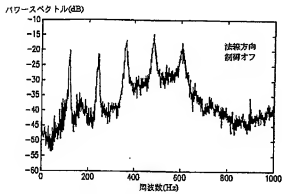


[illegible]

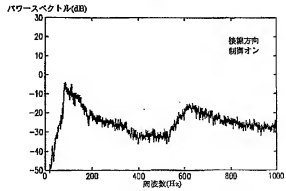
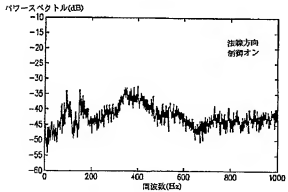
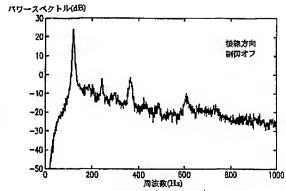
【図13】



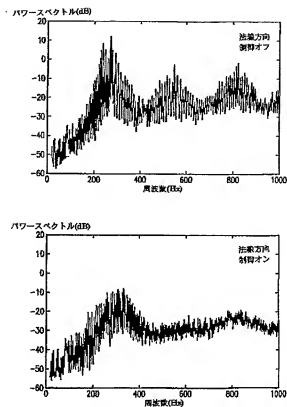
【図15】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(71) 出願人 598077259

600 Mountain Avenue,
Murray Hill, New Je
rsey 07974-0636 U. S. A.

(72) 発明者 ダグラス ロイ ブラウニング

アメリカ合衆国、07869 ニュージャージ
ー、ランドルフ、オーク レーン 10

(72) 発明者 ジョージ グスタフ ジブフェル, ジュニ
ア

アメリカ合衆国、07901 ニュージャージ
ー、サミット、カヌー ブルック パーク
ウェイ 164